



Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der vorliegende Ariadne-Report wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Er spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Corrigendum

In einer früheren Version dieses Reports war eine Korrektur des Flächenverbrauchscoeffizienten für Freiflächenphotovoltaik nicht konsistent umgesetzt. Diese Fehler sind nun behoben und betreffen Angaben zum Flächenverbrauch in der Zusammenfassung (Abschnitt Z.6) und in Kapitel 9 (Abschnitte 9.6 und 9.7). Ebenso wurden die Abbildungen Z.15, 9.8, 9.9 und 9.10 korrigiert. Weiterhin wurden Angaben zu Bruttoinlandsprodukt in Kapitel 1.3 und Tabelle 1.2 korrigiert.

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Oktober 2021

Kopernikus-Projekt Ariadne (2021):
Ariadne-Report: Deutschland auf dem
Weg zur Klimaneutralität 2045 -
Szenarien und Pfade im Modellvergleich.
<https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>

Bildnachweise

Titel: Yeshe Kangrangz / Unsplash; Zusammenfassung: Andrea Boldizar / Unsplash; Kapitel 1: Ashley Batz / Unsplash; Kapitel 2: funky-data / iStock; Kapitel 3: Julian Hochgesang / Unsplash; Kapitel 4: Robin Sommer / Unsplash; Kapitel 5: huangyifei / iStock; Kapitel 6: audioundwerbung / istock; Kapitel 7: Clint Adair / Unsplash; Kapitel 8: Adam Vradenburg / Unsplash; Kapitel 9: Dan Meyers / Unsplash; Kapitel 10: Micheile Henderson / Unsplash

Zusammenfassung

Z.1	Szenarienanalyse zur Klimaneutralität 2045	1
Z.2	Kernelemente der Transformation hin zur Klimaneutralität 2045: Was der Modellvergleich zeigt	2
Z.3	Meilensteine für 2030: Was notwendig ist, um Klimaneutralität 2045 auf den Weg zu bringen	4
Z.4	Elektronen und Moleküle: Die Umstellung auf eine erneuerbare Energieversorgung	6
Z.5	Transformation der Endnutzungssektoren	8
Z.5.1	<i>Verkehr</i>	8
Z.5.2	<i>Gebäudewärme</i>	9
Z.5.3	<i>Industrie</i>	10
Z.6	Umweltwirkungen der Energiewende	11
Z.7	Systemforschung für die Energiewende: Weiterer Forschungsbedarf	13
Z.8	Politischer Handlungsbedarf für die Klimaneutralität 2045	15
	Literaturangaben	16

Autorinnen und Autoren

Gunnar Luderer, Claudia Günther, Dominika Sörgel, Christoph Kost, Falk Benke, Cornelia Auer, Florian Koller, Andrea Herbst, Klara Reder, Diana Böttger, Falko Ueckerdt, Benjamin Pfluger, Daniel Wrede, Jessica Strefler, Anne Merfort, Sebastian Rauner, Kais Siala, Simon Schlichenmaier



DEUTSCHLAND AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT 2045 – DIE KERNERGEBNISSE ZUSAMMENGEFASST

Z.1 Szenarienanalyse zur Klimaneutralität 2045

Im novellierten Klimaschutzgesetz (KSG, 2021) ist das ambitionierte Ziel festgehalten: Schon 2045 will Deutschland Klimaneutralität erreichen. Klimaneutral, das bedeutet, sämtliche Treibhausgas (THG)-Emissionen von der Stromerzeugung über die Industrie bis hin zu Gebäuden, Verkehr und Landwirtschaft so weit wie möglich zu reduzieren, während nicht vermeidbare Emissionen durch Treibhausgas-Senken ausgeglichen werden. Bis 2045 muss also die Netto-Emissionsbilanz auf Null gedrückt werden. Um das zu erreichen, legt das Klimaschutzgesetz für 2030 das konkrete Zwischenziel einer THG-Emissionsminderung um mindestens 65 % gegenüber 1990 fest.

Klar ist, dass Klimaneutralität in weniger als 25 Jahren nur durch eine beispiellos zügige und tiefgreifende Transformation des gesamten Energiesystems erreicht werden kann. Hinter der Klimaneutralität steht also eine gewaltige Kraftanstrengung, sowohl bei der Bereitstellung als auch bei der Nutzung von Energie in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr. Doch so klar das Ziel ist, so offen ist der Weg dorthin. Wie kann der Umstieg auf eine fast vollständig auf Er-

neuerbaren Energien basierende Energieversorgung schnellstmöglich gelingen? Welche Transformationen müssen in der Industrie, beim Verkehr und im Gebäudesektor erreicht werden und wie interagieren diese miteinander? Was muss wann und in welchem Bereich passieren, um Klimaneutralität zu erreichen? Welche Rolle können Wasserstoff und strombasierte E-Fuels spielen? Und schließlich: Was ist schon bis 2030 notwendig, um den Weg zur Klimaneutralität zu ebnen? Es besteht ein hoher Bedarf an differenziertem Orientierungswissen zur konkreten politischen Ausgestaltung dieser Transformation.

Erstmals stellt die vorliegende Szenarienanalyse für Deutschland konkrete Transformationspfade zur Klimaneutralität 2045 auf der Basis eines umfassenden Modellvergleichs vor. Das Besondere an dieser Studie des Ariadne-Projektes ist, dass sechs Gesamtsystem- und Sektormodelle in einer Studie integriert wurden, die sich in ihren jeweiligen Stärken ergänzen: Für spezifische Fragestellungen wurde jeweils dasjenige Modell als Leitmodell hervorgehoben, welches die entsprechenden Aspekte am genauesten abbildet. Weitere Modelle wurden genutzt, um Auswirkungen der Transformation auf Umweltschutzgüter und die Verteilung der Kosten auf verschiedene

Einkommensgruppen zu analysieren. Dieser breit gefächerte Ansatz ermöglicht es, die Implikationen der Energiewende robust und im Detail zu beschreiben. Im Unterschied zu bereits existierenden Szenarien (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021) wurde nicht nur ein Transformationspfad modelliert, sondern insgesamt sechs Zielerreichungsszenarien. Diese Zielszenarien wurden in vier Szenariogruppen geclustert, die sich bezüglich der Rolle von Elektrifizierung, Wasserstoff und synthetischen E-Fuels sowie der Importe Erneuerbarer Energie unterscheiden (Tabelle Z.1). Die unterschiedlichen Technologieausrichtungen führen zu verschiedenen Profilen in den Transformationsherausforderungen: Während beispielsweise eine stärkere Elektrifizierung eine schnellere Transformation der Endnutzung erfordert, wird für die verstärkte

Nutzung von Wasserstoff und E-Fuels ein zügigerer Hochlauf der entsprechenden Produktionskapazitäten und Infrastrukturen benötigt. Zusätzlich werden aufgrund der hohen wirtschaftlichen und geopolitischen Relevanz unterschiedliche Ausprägungen von Importmöglichkeiten analysiert. Durch die vorliegende Modellvielfalt und Szenario-Variationen können einerseits Bandbreiten plausibler Entwicklungen sowie Unsicherheiten abgeleitet werden. Andererseits ist es möglich, sowohl Spielräume als auch kritische Engpässe der Energiewende abzuschätzen, wie beispielsweise den Mindestbedarf an Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) oder die Größenordnung notwendiger sogenannter negativer Emissionen, also CO₂-Entnahmen aus der Atmosphäre zum Ausgleich nicht vermeidbarer Emissionen.

Z.2 Kernelemente der Transformation hin zur Klimaneutralität 2045: Was der Modellvergleich zeigt

Über alle eingesetzten Modelle und Technologieannahmen hinweg lassen sich von den hier entwickelten Klimaschutzpfaden die folgenden acht Kerneinsichten robust ableiten:

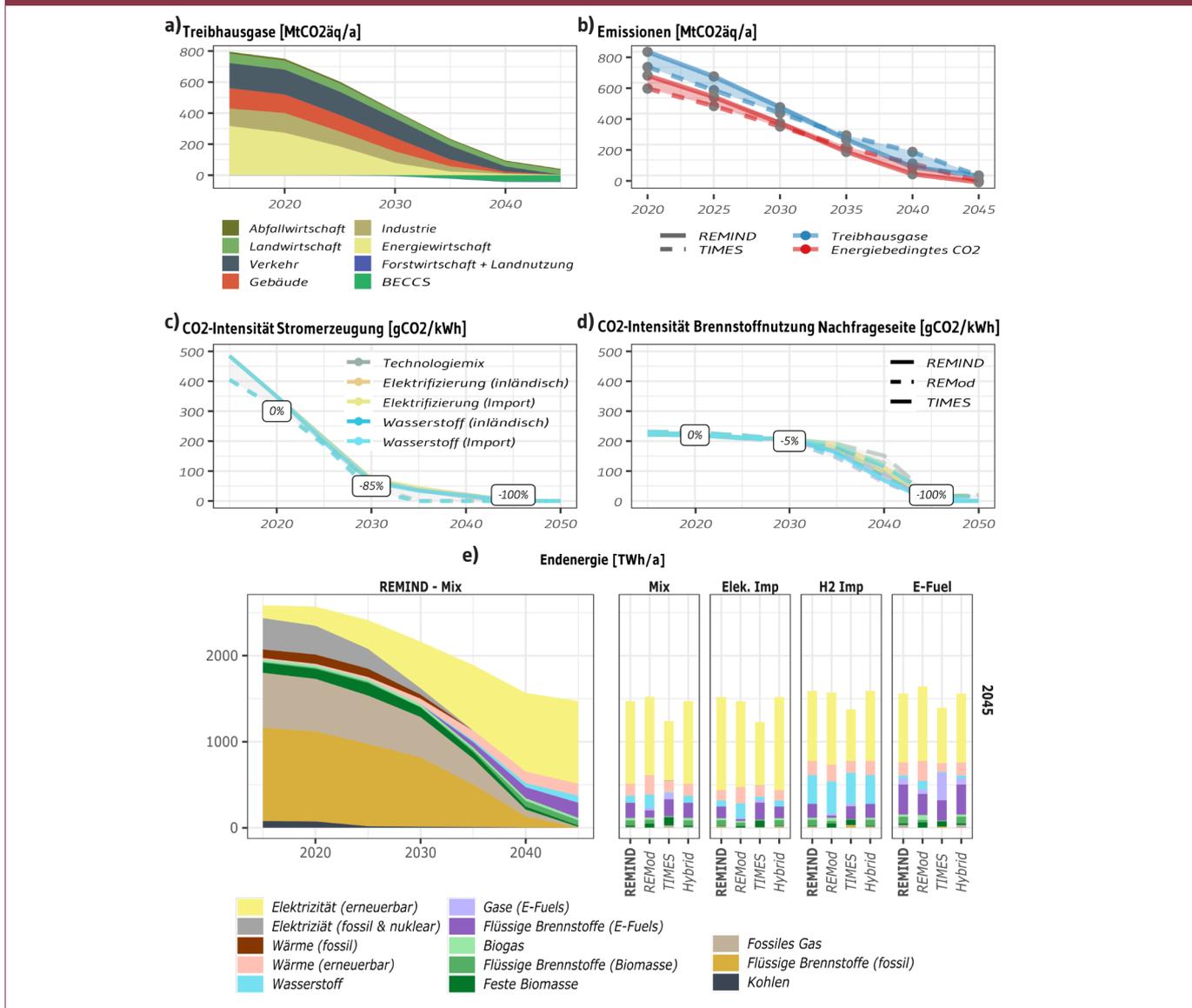
- 1. Die zentralen Energieträger in einem klimaneutralen Energiesystem sind hauptsächlich erneuerbarer Strom, grüner Wasserstoff und grüne E-Fuels sowie nachhaltig erzeugte Biomasse.** Die Szenarienanalyse zeigt, dass der Weg zur Klimaneutralität über einen nahezu vollständigen Verzicht auf fossile Energieträger erreichbar ist. Während heute Mineralöl, Erdgas und Kohle noch knapp 80 % der Primärenergienachfrage decken (AGEB, 2020a) sinkt ihr Anteil in einem klimaneutralen Deutschland in allen Zielszenarien langfristig auf nahe Null (Abbildung Z.1e). Die Nutzung fossiler Brennstoffe wird auch aufgrund von substantiellen prozessbedingten und landwirtschaftlichen Restemissionen sowie langen Planungsvorläufen und begrenzter Verfügbarkeit von Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) limitiert (Kapitel 8).
- 2. Eine zunehmend erneuerbare Stromversorgung ist die tragende Säule der weiteren Dekarbonisierung des Energiesystems.** Die Dekarbonisierung der Stromversorgung kann deutlich schneller erreicht werden als jene der nicht-elektrischen Energieversorgung. Um Deutschland auf Kurs zur Klimaneutralität 2045 zu bringen, sinkt die CO₂-Intensität der Stromversorgung – also die fossilen CO₂-Emissionen pro bereitgestellter Kilowattstunde – bereits bis 2030 um 82-92 % gegenüber 2019, maßgeblich aufgrund eines beschleunigten Kohleausstiegs (siehe Z.3). Die begrenzte Verfügbarkeit von Bioenergie, Wasserstoff und E-Fuels führt dazu, dass die fossile CO₂-Intensität nachfrageseitig genutzter Brennstoffe erst ab 2035 spürbar sinkt (Abbildung Z.1c und d).

Tabelle Z.1: Überblick über die für die Modellanalyse erarbeiteten Kernszenarien

	Technologieausrichtung	Szenariename [Abkürzung]	Beschreibung	Importe von Erneuerbarer Energie
Zielszenarien Klimaneutralität 2045	1 Ausgewogener Technologiemix	Technologiemix [Mix]	Nutzung eines gemischten Energieträgerportfolios (Wasserstoff, Elektrifizierung und synthetische Kraftstoffe) in der Endenergienutzung	Gesamtimportpotenzial für EE-basierte Energieträger von 250-350 TWh in 2045
	2 Direkte Elektrifizierung	Elektrifizierung (inländisch) [Elek. DE]	Priorisierung der Direktelektrifizierung in den Endnutzungssektoren	Beschränkte Importpotenziale (130-200 TWh in 2045) führen zu hoher einheimischer EE-Erzeugung
		Elektrifizierung (Import) [Elek. Imp]		Gesamtimportpotenzial für EE-basierte Energieträger von ca. 230-360 TWh in 2045, davon 50-100 TWh Strom
	3 Wasserstoff	Wasserstoff (inländisch) [H2 DE]	Verstärkte direkte Nutzung von Wasserstoff in Bereichen, deren direkte Elektrifizierung schwierig ist	Beschränkte Importpotenziale (150-190 TWh in 2045, davon 100 TWh Wasserstoff) führen zu hoher einheimischer EE-Erzeugung
Wasserstoff (Import) [H2 Imp]		Gesamtimport-Potenzial für EE-basierte Energieträger von 350-580 TWh in 2045, davon 250-400 TWh Wasserstoff		
4 E-Fuels	E-Fuels [E-Fuel]	Nutzung von erneuerbaren synthetischen Kraftstoffen, z.B. von <i>green E-Fuels</i> ; zusätzlich wichtige Rolle von direkter Elektrifizierung	Gesamtimport-Potenzial für EE-basierte Energieträger von ca. 480-620 TWh in 2045, davon ca. 500 TWh E-Fuels	
	Trend	Trend	Fortschreibung der Politikambition vor dem KSG2019	

Im Trend-Szenario werden die Politikambitionen vor dem KSG2019 fortgeschrieben („Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)“, 2019).

Abbildung Z.1: Charakteristische Eigenschaften von Transformationspfaden zur Klimaneutralität



(a) Sektorale Treibhausgasemissionen im Technologiemix-Szenario (REMIND Modell); (b) Spannweite der energiebedingten CO₂-Emissionen (inkl. negativer Emissionen durch BECCS) und der Gesamttreibhausgasemissionen in verschiedenen Zielszenarien (REMIND und TIMES-PanEU Modelle); fossile CO₂-Intensität (c) der Stromerzeugung und (d) der Brennstoffnutzung in den Nachfragesektoren; (e) Entwicklung des Endenergiebedarfs inklusive stofflicher Nutzung bis 2050 (REMIND-Mix-Szenario), sowie Endenergiebedarfen in 2045 für verschiedene Modelle und Szenarien.

3. Die direkte Elektrifizierung des Energieverbrauchs spielt eine zentrale Rolle. In den Zielszenarien steigt der Anteil der Elektrizität an der Endenergie von 18 % in 2019 bis 2045 auf 40-69 %. Zusätzlich zu dieser direkten Elektrifizierung trägt die indirekte Elektrifizierung über Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe zu 8-37 % zur Endenergie bei (siehe Z.4). Somit erfolgt die Umstellung in den Sektoren Verkehr, Gebäude, Industrie von fossilen Brennstoffen auf Strom, Wasserstoff, E-Fuels und Biomasse. Für diese Umstellung ist es erforderlich, die heimische Erzeugung von Wind und PV massiv zu steigern.

4. Die Steigerung der Energieeffizienz führt in den Zielszenarien bis 2045 zu einem Rückgang des Endenergieverbrauchs um 34-59 % gegenüber 2019. Weil die Nutzung von Strom bei vielen Anwendungen – beispielsweise in Form von E-Mobilität oder Wärmepumpen – eine deutlich bessere Umwandlungseffizienz hat als die Nutzung von Brennstoffen, trägt die Elektrifizierung zudem maßgeblich zur Minderung der Endenergienachfrage bei. Szenarien mit hohen Effizienzsteigerungen führen zu geringeren Zubaubedarfen für Erneuerbare Energien.

5. Die Klimaneutralität 2045 erfordert die vorherige Erreichung der CO₂-Neutralität sowie die Erschließung von Senken zur CO₂-Entnahme. Trotz eines weitgehenden Ausstiegs aus der Nutzung fossiler Energien werden jährlich CO₂-Senken im Umfang von mindestens 41-74 MtCO₂ benötigt, um verbleibende Treibhausgasemissionen zu kompensieren – insbesondere schwer vermeidbarer prozessbedingte CO₂-Emissionen der Industrie sowie Methan- und Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft. Die benötigte CO₂-Entnahme könnte auch höher ausfallen, wenn zum Beispiel die vollständige Vermeidung energiebedingter CO₂-Emissionen

oder eine deutliche Reduktion der Emissionen aus der Viehzucht nicht realisiert werden.

6. Es gibt verschiedene Optionen zur CO₂-Entnahme, deren technisches Potenzial sich bis 2045 auf über 100 MtCO₂ summieren könnte.

Dabei unterliegen alle Optionen spezifischen Risiken wie hohem Ressourcenaufwand und schädlichen Umweltwirkungen. Zusätzliche Einschränkungen können aus mangelnder Permanenz und gesellschaftlicher Akzeptanz resultieren. Aufgrund der bestehenden Unsicherheit über die zukünftige Senkenleistung der Biosphäre sowie des Risikos, dass durch Umwelteinflüsse wie Waldbrände oder Schädlinge der Kohlenstoffspeicher im Wald verloren geht, sollten auch technische CO₂-Senken, beispielsweise durch Bioenergienutzung mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung, entwickelt werden. Diese sind auch wichtig, um die Klimaziele gegen das Risiko potentiell höherer Restemissionen abzusichern.

7. Die Energiewende bringt einen erheblichen Zusatznutzen für die Gesundheit, geht aber auch mit neuen Herausforderungen auf anderen Umwelthandlungsfeldern einher.

Die Energiewende erhöht den Bedarf an den Metallen Lithium, Nickel, Kobalt, Dysprosium, Iridium und Vanadium auf ein Niveau, das angesichts der begrenzten globalen Reserven zu kritischen Engpässen führen könnte. Der Flächenbedarf für die Energiebereitstellung in Deutschland könnte hingegen sogar leicht reduziert werden: obwohl sich durch den Anstieg des Bedarfs an einheimisch produziertem erneuerbarem Strom der Flächenbedarf für Wind- und Freiflächen-PV-Anlagen erhöht, kann dieser jedoch gleichzeitig durch einen Rückgang der Anbaufläche für Biomasse kompensiert werden. Die zunehmende Abkehr von Verbrennungsprozessen führt zu einem erheblichen Zusatznutzen der Energiewende, da sie Luftverschmutzung verringert und so die öffentliche Gesundheit verbessert.

8. Die Klimaschutz-Ziele für 2030 und 2045 sind extrem herausfordernd und können nur mit massiven Investitionen, zusätzlichen politischen Maßnahmen und Infrastrukturaufbau in allen Sektoren erreicht werden.

Die starke Beschleunigung der Energiewende bis 2030 ist von besonderer Relevanz. Ohne enorme Dekarbonisierungs- und Infrastrukturmaßnahmen in diesem Jahrzehnt werden die Klimaschutzziele für 2030 verfehlt – damit würde auch das Erreichen des Langfristziels der Klimaneutralität 2045 hochgradig unwahrscheinlich werden.

Z.3 Meilensteine für 2030: Was notwendig ist, um Klimaneutralität 2045 auf den Weg zu bringen

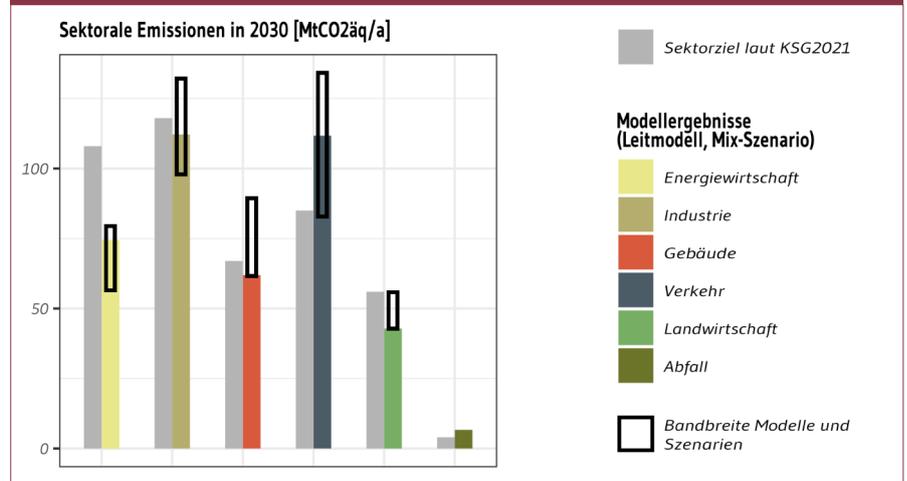
In dieser Dekade sind im Vergleich zum letzten Jahrzehnt deutlich gesteigerte Klimaschutzanstrengungen in allen Sektoren notwendig, um die für 2030 festgelegten Emissionsminderungsziele des KSG2021 zu erreichen und gleichzeitig entscheidende Weichen für das Langfristziel der Klimaneutralität zu stellen. Folgende sechs Meilensteine für 2030 ergeben sich aus der Szenarienanalyse und dem Modellvergleich:

1. Eine stärkere Dekarbonisierung der Energiewirtschaft bis 2030 ist kostengünstiger als der im KSG2021 vorgesehene Transformationspfad.

Das laut KSG2021 festgelegte Gesamtziel für 2030 – eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 65 % gegenüber 1990 – wird in allen Szenarien annahmebedingt erreicht (Abbildung Z.2). Allerdings werden die sektoralen Ziele des Verkehrs- und Gebäudesektors in vielen Szenarien verfehlt und durch stärkere Emissionsminderungen in der Energiewirtschaft ausgeglichen. Das im KSG2021 festgelegte Ziel für den Gebäudesektor in 2030 ist nur unter sehr großen Anstrengungen erreichbar und nicht Teil des kostenoptimalen Transformationspfads. Im Verkehrssektor wird das 2030-Sektorziel durch die hier modellierte Antriebswende in der Mehrheit der Szenarien verfehlt.

2. In den kostenoptimalen Zielszenarien erfolgt der Ausbau von Wind und Photovoltaik (PV) deutlich stärker und der Kohleausstieg deutlich früher als bislang vorgesehen: So können die Emissionen der Energiewirtschaft bis 2030 um etwa zwei Drittel gesenkt werden gegenüber 2019 (Abbildung Z.3b). Für die starke Dekarbonisierung der Energiewirtschaft

Abbildung Z.2: Sektorale Treibhausgasemissionen der Leitmodelle im Technologiemix-Szenario (farbige Balken) sowie Bandbreite über Szenarien und Modelle hinweg (schwarze Boxen)

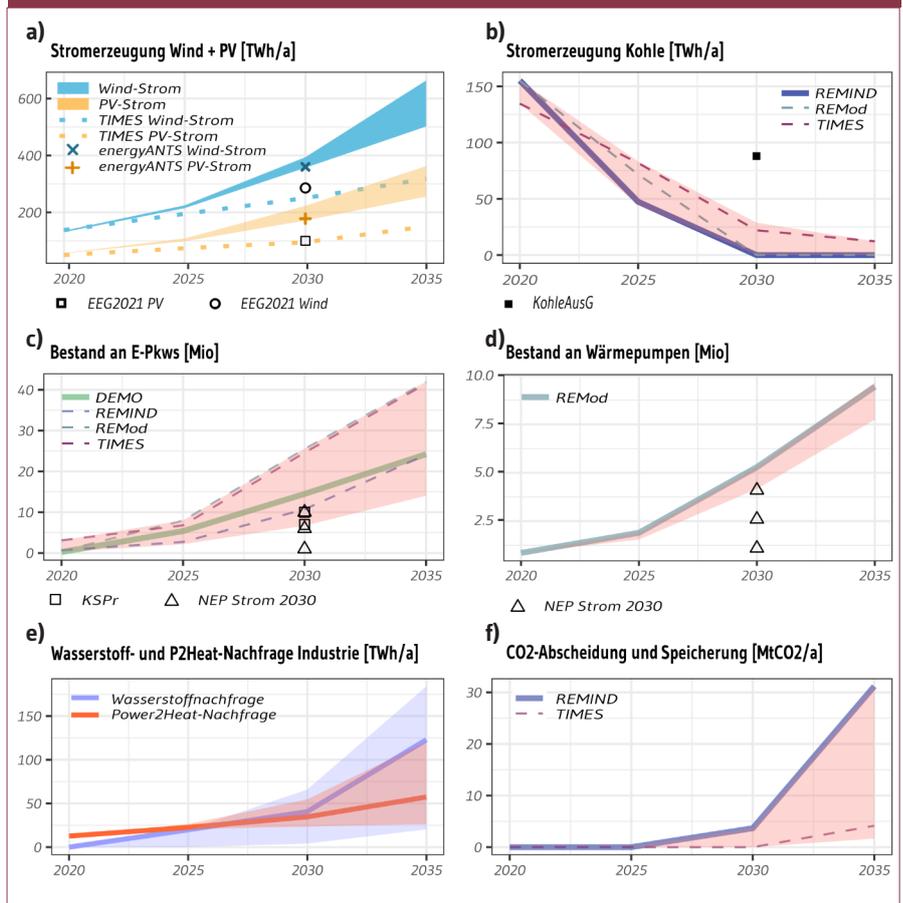


Die grauen Balken zeigen das entsprechende Sektorziel laut KSG2021 (KSG, 2021).

bis 2030 ist eine Verdreifachung der Wind- und PV-Erzeugung laut REMIND und REMod auf 550-615 TWh bis zum Jahr 2030 notwendig (Abbildung Z.3a) – das liegt erheblich über den derzeit im EEG2021 anvisierten Strommengen (2029: 376 TWh). Die hierfür erforderlichen Kapazitäten für Wind und PV liegen am oberen Rand des auf Basis von geographisch hoch aufgelösten Analysen abgeschätzten Ausbaukorridors (Kapitel 5). Laut energyANTS-Modell ist ein Zubau für 2030 in Höhe von etwa 120 GW Wind und 185 GW PV notwendig, um die hohe Erzeugung zu realisieren (Kapitel 5). Nur durch eine deutliche Reduktion der Endenergienachfrage um etwa 35 % bis 2030 durch Effizienzgewinne wären die Ausbaupfade des EEG2021 (EEG, 2021) mit den Klimazielen für 2030 vereinbar (TIMES-PanEU-Modell). Darüber hinaus zeigen alle Szenarien, dass die Kohleverstromung aufgrund der CO₂-Bepreisung zunehmend unwirtschaftlich wird, was zu einem vollständigen oder nahezu vollständigen Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 führt (Abbildung Z.3b). Der stark erhöhte Anteil an Erneuerbaren Energien am Strommix (2030: 76-89 %) sowie die steigende Stromnachfrage machen zudem einen beschleunigten Ausbau der Netzinfrastruktur im Bereich der Übertragungs- und Verteilnetze unerlässlich.

3. In den Endnutzungssektoren Gebäude, Verkehr und Industrie muss bereits bis 2030 ein konsequenter Umstieg der Energieträger durch direkte und indirekte Elektrifizierung stattfinden, um den Kurs auf Klimaneutralität 2045 anzupassen. Laut dem Sektorleitmodell REMod erfordert die Dekarbonisierung des Gebäudesektors bereits vor 2030 einen Dreiklang aus einer steigenden jährlichen Sanierungsrate auf 1,5-2 %, der Installation von etwa 5 Mio. Wärmepumpen (Abbildung Z.3d) sowie den Neuanschluss von etwa 1,6 Mio. Ge-

Abbildung Z.3: Ausgewählte Indikatoren zur Erreichung der Meilensteine 2030



(a) Spannweite der Wind- und PV-Erzeugung in allen Szenarien in den Leitmodellen REMIND und REMod sowie in TIMES-PanEU im Technologiemit-Szenario und energyANTS im Kombinations-Szenario²; (b) Stromerzeugung aus Kohle im Technologiemit-Szenario; (c) Bestand an E-Pkw im Technologiemit-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche); (d) Bestand an Wärmepumpen im Technologiemit-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche); (e) Power2Heat- und Elektrolyse-Wasserstoffnachfrage der Industrie im Leitmodell FORECAST im Mix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche); (f) CO₂-Abscheidung und -Speicherung im Mix-Szenario (Liniendiagramm) sowie in allen anderen Szenarien (rote Fläche).

Quellen: (BNetzA, 2019; EEG, 2021; KohleAusG, n.d.; KSPR, 2019)

bäuden an das Fernwärmenetz. Für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis zum Jahr 2045 sind bereits bis 2030 bedeutende Schritte in der Antriebswende nötig. In der nächsten Dekade spielt die direkte Elektrifizierung des Personenverkehrs eine prioritäre Rolle. Laut der Verkehrsleitmodelle DEMO und VECTOR21 sind in allen Technologiepfaden mindestens 14 Mio. E-Pkw im Bestand des Jahres 2030 erforderlich (Abbildung Z.3c). Diese Zahl übersteigt die Zielspanne von 7-10 Mio. des noch aktuellen Klimaschutzprogramms 2030 (KSPR, 2019) um 40 %. Ein damit konsistenter Ausbau der Ladeinfrastruktur erfordert unter der

Annahme, dass wenig öffentlich und öffentlich wenig schnell geladen wird, mindestens 50.000 öffentlich zugängliche Schnellladepunkte in Kombination mit etwa 480.000 öffentlich zugänglichen Normalladepunkten¹. Im Industriesektor ist der Zeithorizont bis 2030 entscheidend, denn in diesem Zeitraum müssen CO₂-neutrale Verfahren vom Pilot- und Demonstrations-Maßstab auf industrielles Niveau skaliert und wirtschaftlich betrieben werden können. Laut Sektormodell FORECAST entfällt die höchste Minderung bis 2030 mit mehr als 30 MtCO₂ auf den Brennstoffwechsel (für Dampferzeugung und Öfen) hin zu Strom, Was-

¹ Die Anzahl der benötigten öffentlichen Ladepunkte hängt sowohl vom gesamtwirtschaftlichen Technologiefokus (direkte vs. indirekte Elektrifizierung) als auch vom Ladeinfrastrukturkonzept (Anteil Schnellladestationen) und Ladeverhalten (öffentlich vs. privat) ab.

² Für die Berechnung der implizierten EEG-Erzeugungsmengen werden die Zielkapazitäten des EEG2021 für 2030 mit 2900 Volllaststunden für Onshore Wind, 4000 Volllaststunden für Offshore Wind, 1000 Volllaststunden für PV (Kapitel 5) verrechnet.

³ Zur Berechnung der aus dem KohleAusG resultierenden Kohlestrommenge werden die im KohleAusG für 2030 angegebenen Kapazitäten mit durchschnittlich 5200 Volllaststunden in Anlehnung an (Gierkink et al., 2019; Graichen et al., 2019; Matthes et al., 2019) verrechnet.

serstoff und Gas (Abbildung Z.3e), deren Bereitstellung entsprechend gewährleistet werden sollte.

4. **Der Technologiehochlauf von Wasserstoff und E-Fuels muss zügig beginnen, um die hohen Langfristbedarfe decken zu können.** Die Verfügbarkeit von erneuerbarem Wasserstoff und E-Fuels wird zumindest mittelfristig bis in die 2030er-Jahre beschränkt bleiben. Entsprechend wird in den Szenarien ihr Einsatz für Anwendungen dort priorisiert, wo es keine Möglichkeit zur direkten Elektrifizierung gibt, zum Beispiel Ammoniakproduktion, Primärstahlerzeugung, Grundstoffchemie sowie Flug- und Schiffsverkehr. Für den Industriesektor besteht laut Sektormodell FORECAST ein Wasserstoffbedarf von etwa 40 TWh in 2030 (Technologiemix-Szenario) (Abbildung Z.3e).
5. **Das Ziel der Klimaneutralität ist ohne CO₂-Entnahmen nicht erreichbar.** Der Technologiehochlauf sowie der Infrastruktur-Aufbau sollten daher bis 2030 signifikante Mengen erreichen. Für die Pilotierung der Abscheidung und geologischen CO₂-Speicherung erscheinen 2-5 Mio. t CO₂ in 2030 als sinnvoller Meilenstein (Abbildung Z.3f). Zudem sollten auch landbasierte Methoden wie die Kohlenstoffbindung im Boden oder eine erhöhte Senkenleistung des Waldes gefördert werden.
6. **Infrastruktur: Die modellierten Mengen an Strom, Fernwärme, Wasserstoff sowie relevanten Kenngrößen für die Sektorkopplung wie E-Fahrzeuge und Wärmepumpen liegen über den Mengen, die in den aktuellen Infrastrukturplanungen vorgesehen sind** (Abbildung Z.3a, c, d). Eine rasche Anpassung der Infrastrukturplanung und ihre Umsetzung ist daher notwendig.

Z.4 Elektronen und Moleküle: Die Umstellung auf eine erneuerbare Energieversorgung

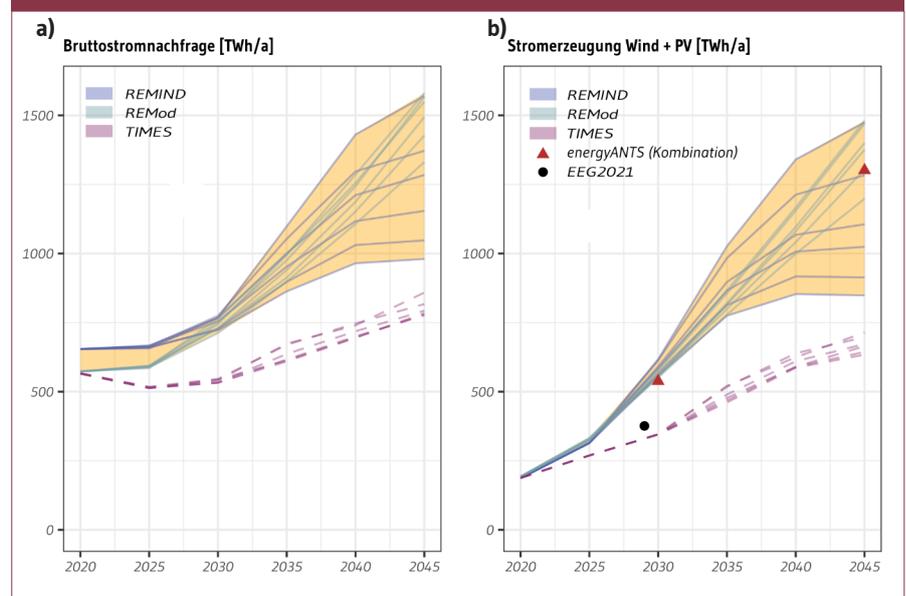
Zusätzlich zur direkten Elektrifizierung kommt der indirekten Elektrifizierung der Energieversorgung über erneuerbaren Wasserstoff und E-Fuels eine wichtige Rolle zu. Klar ist, dass angesichts der begrenzten Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse und von Geothermie fossile Energieträger zukünftig zu großen Teilen sowohl durch Strom (direkte Elektrifizierung) als auch Wasserstoff und E-Fuels (indirekte Elektrifizierung) ersetzt werden müssen (Kapitel 6). Die Umstellung auf Erneuerbare Energien über die direkte Elektrifizierung („Elektronen“) zeichnet sich durch eine besonders hohe Umwandlungseffizienz aus. Die Nutzung der Erneuerbaren über Wasserstoff und E-Fuels („Moleküle“) ist insbesondere für die Produktion von Primärstahl, die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie und schwer elektrifizierbare Endnutzungen wie Hochtemperaturprozesse oder den Flugverkehr relevant. Zudem kann die flexible Erzeugung von Wasserstoff einen bedeutenden Beitrag zur Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung leisten.

Die direkte und indirekte Elektrifizierung der Energienachfrage führt zu einer massiven Zunahme des nationalen

Bruttostrombedarfs auf 780-1.580 TWh im Jahr 2045. Die Bandbreite des Strombedarfs wird maßgeblich durch den Umfang erneuerbarer Energieimporte und die Entwicklung der nachfrageseitigen Energieeffizienz bestimmt. Im Vergleich zu seinem heutigen Niveau von etwa 580 TWh in 2019 (AGEB, 2020b), steigt der Bruttostromverbrauch um etwa 23-34 % bis 2030 und 70-170 % im Jahr 2045 in allen Zielszenarien von REMIND und REMod (Abbildung Z.4a). Im Modell TIMES-PanEU, welches sehr hohe Effizienzverbesserungspotenziale in allen Sektoren annimmt, steigt die Bruttostromnachfrage bis 2045 lediglich um 34-48 %.

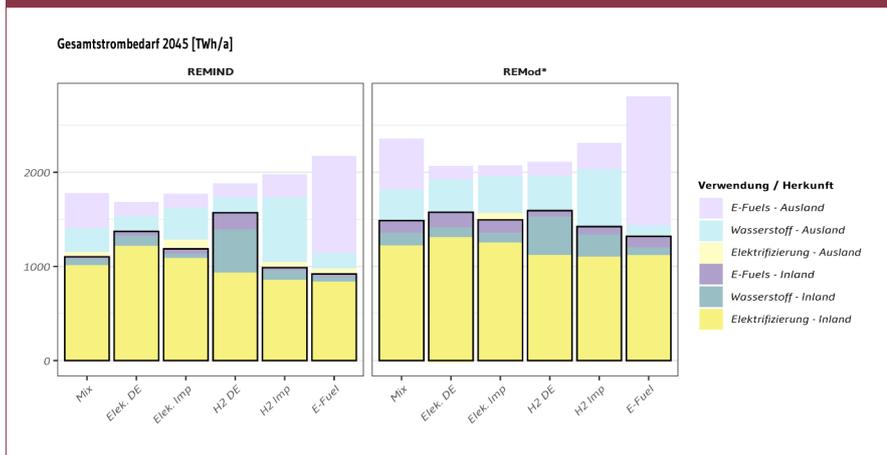
Der überwiegende Teil der Stromnachfrage wird durch einen massiven Ausbau der einheimischen Stromerzeugung aus Solar- und Windenergie auf 630-1.480 TWh im Jahr 2045 gedeckt. In einem Großteil der Szenarien müssen die in Kapitel 5 ermittelten Potenziale für Sonnen- und Windstromerzeugung vollständig genutzt werden. So spielen sowohl PV-Freiflächenanlagen, Dachanlagen, Wind Onshore als auch Wind Offshore eine wichtige Rolle. Das untere Ende der Bandbreite wird durch Pfade mit sehr hoher Effizienzverbesserung (TIMES-PanEU-Modell) beschrieben. Je höher der Gesamtstrombedarf 2045 ist, zum Beispiel durch hohe einheimische

Abbildung Z.4: Entwicklung der Elektrifizierung



(a) Bruttostromnachfrage in den Gesamtsystemmodellen REMIND und REMod in allen Zielszenarien und (b) Entwicklung der Stromerzeugung aus Wind und PV in den Gesamtsystemmodellen REMIND und REMod (gelb hinterlegt) sowie in TIMES-PanEU in allen Zielszenarien und energyANTS im Kombinations-Szenario.

Abbildung Z.5: Gesamtstrombedarfe im Inland und Ausland in den Modellen REMIND, REMod* in ausgewählten Zielszenarien⁴



deckt werden. Die zunehmende direkte und indirekte Elektrifizierung der Endenergienachfrage schafft also starke Synergien zur Integration des fluktuierenden erneuerbaren Stroms. Demand-Side-Management des konventionellen Verbrauchs aus bestehenden Stromanwendungen leistet langfristig hingegen einen vergleichsweise geringen Beitrag zur Flexibilisierung des Stromsystems.

In den Zielszenarien besteht eine erhebliche Bandbreite bezüglich des jeweiligen Grads an direkter und indirekter Elektrifizierung der Endenergienachfrage sowie den daraus resultierenden Mengen an Strom, Wasserstoff und E-Fuels (Abbildung Z.7). Im Zieljahr der Klimaneutralität liegt der Anteil von Strom an der Endenergie zwischen 40 % und 69 % (Abbildung Z.7a). Wasserstoff und E-Fuels decken zusammen zwischen 8 % und 37 % des Endenergiebedarfs des Jahres 2045 (Abbildung Z.7c). In Szenarien mit Fokus auf direkter Elektrifizierung wird die Nutzung von E-Fuels im Wesentlichen auf Anwendungen in spezifischen Industriesektoren, Schiffs- und Flugverkehr, sowie als Backup-Energieträger in der Energiewirtschaft beschränkt bleiben.

In Wasserstoff-fokussierten Szenarien spielen Brennstoffzellenfahrzeuge im Schwerlastverkehr eine dominante Rolle, zudem wird Wasserstoff zum dominanten Energieträger für Hochtemperaturprozesse in der Industrie.

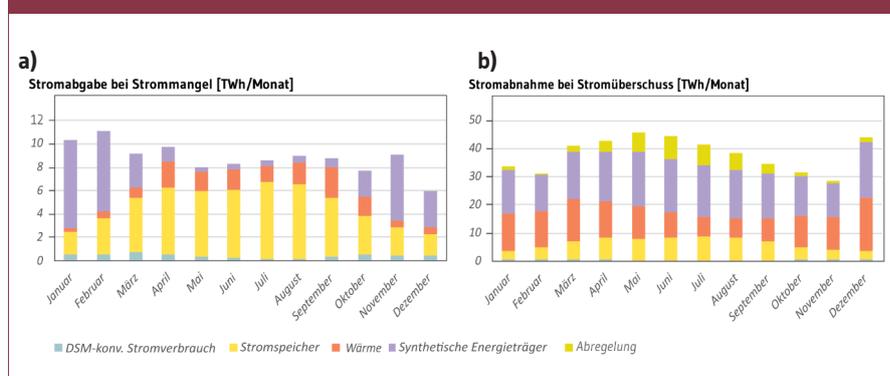
Power-to-X-Erzeugung, desto geringer ist der Spielraum bezüglich des Erneuerbaren-Ausbaupfades und der Gewichtung zwischen Wind und Solar. Für das Jahr 2030 überschreitet die Wind- und Solarstromerzeugung den Strommengenpfad des EEG2021 deutlich (siehe Z.3). Der Vergleich der notwendigen Gesamtstrommengen in den unterschiedlichen Technologieszenarien führt zu zwei wichtigen Schlussfolgerungen: Erstens ist in allen Szenarien eine hohe heimische Stromerzeugung notwendig. Zweitens führt eine Fokussierung auf Wasserstoff und E-Fuels zu einer erhöhten Importabhängigkeit, da diese zu großen Teilen importiert werden müssen. Diese Importe erfordern wiederum Stromerzeugungsmengen von bis zu 1.500 TWh/a im Ausland und verlagern somit einen Teil der Energiewende-Transformationsleistung ins Ausland (Abbildung Z.5, Abschnitt Z.6).

sowie der Brennstoffherzeugung.

Power-to-Fuel-Technologien, zeitlich flexible Wärmeerzeugung für Gebäude und Industrie sowie Batteriespeicher ermöglichen eine erhebliche Verbesserung der zeitlichen Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch, so dass eine effektive Nutzung der erneuerbaren Erzeugung aus Wind- und Sonnenstrom möglich wird (Abbildung Z.6). In den Zielszenarien wird in der Zeitspanne 2041-2045 nur 2-6 % der Stromerzeugung abgeregelt. In Zeiten geringer erneuerbarer Stromerzeugung wird die flexible Nachfrage durch Sektorkopplungstechnologien zurückgefahren, während die verbleibenden Lücken zur inflexiblen Nachfrage durch Ausspeichern und auf synthetischem Methan oder Wasserstoff basierenden Backup-Kraftwerken ge-

Die zunehmende Bedeutung der Stromerzeugung aus fluktuierender Wind- und Solarenergie erfordert Energiespeicher sowie eine zunehmende Flexibilisierung des Energiesystems. Die Detailanalysen in Kapitel 7 zeigen, dass es auch in den erneuerbar dominierten, klimaneutralen Energiesystemen ausreichend technische Ansätze gibt, um Stromangebot und -nachfrage in Einklang zu bringen. Eine besonders wichtige Rolle spielt dabei die Sektorkopplung, also die zunehmende Verzahnung der Stromwirtschaft mit den Nachfragesektoren Industrie, Verkehr und Gebäude

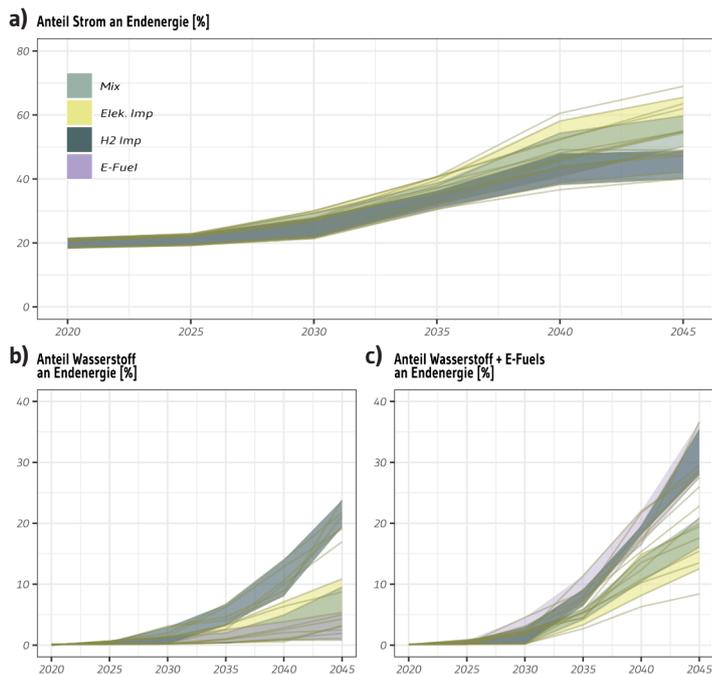
Abbildung Z.6: Flexibilisierung des Stromsystems



(a) Gesammelte flexible Stromabgabe bei Strommangel; (b) gesammelte flexible Stromabnahme bei Stromüberschuss. Gezeigt ist jeweils der Durchschnitt in den Jahren 2041–2045 des Technologiemit-Szenarios im REMod-Modell. Die Ergebnisse zum Demand-Side-Management des konventionellen Stromverbrauchs wurden mit dem Modell E2M2 erarbeitet.

⁴ Für die Berechnung der implizierten Strommengen im Ausland wird eine Effizienz von 60% für Wasserstoff und 40% für E-Fuels angenommen. In REMod* wurden Bedarfe für nicht-energetische Nutzung von Wasserstoff und E-Fuels im Industriesektor auf Basis des FORECAST-Modells ergänzt.

Abbildung Z.7: Anteil Strom, Wasserstoff sowie Wasserstoff + E-Fuels am gesamten Endenergieverbrauch inklusive Bunkertreibstoffen und stofflicher Nutzung in den Gesamtsystemmodellen gruppiert nach Szenarien



(a) Bandbreite des Stromanteils in der Endenergienachfrage; (b) Bandbreite des Elektrolyse-Wasserstoffanteils in der Endenergienachfrage und (c) Bandbreite des E-Fuels-Anteils in der Endenergienachfrage. Die Anteile aller dargestellten Energieträger enthalten heimische Erzeugung und Importe.

Z.5 Transformation der Endnutzungssektoren

Die Transformation der Endnutzungssektoren Industrie, Verkehr und Gebäudewärme stellt eine besonders große Herausforderung auf dem Weg zur Klimaneutralität dar. Während die THG-Emissionen dieser Sektoren zwischen 2010 und 2019 insgesamt nur um etwa 3 % zurückgingen, zeigen die Klimaschuttszenarien der Sektormodelle eine Minderung von 37 % zwischen 2020 und 2030, und 88 % zwischen 2020 und 2040. Trotz dieser Beschleunigung des Minderungstempos werden die KSG-Zielvorgaben für die Nachfragesektoren, insbesondere Verkehr und Gebäude, in vielen Szenarien nicht eingehalten (Z.3). In den Nachfragesektoren schreitet der Energieträgerwechsel zu nicht-fossilen Brennstoffen deutlich langsamer voran als in der Energiewirtschaft. Hierfür ist eine Vielzahl von Herausforderungen verantwortlich, beispielsweise lange Reinvestitionszyklen, fehlende Infrastruktur, mangelnde Wirtschaftlichkeit oder die fehlende Verfügbarkeit klimaneutraler Energieträger.

Der Einsatz kohlenstoffbasierter Brennstoffe in der Endnutzung sinkt insbesondere ab den 2030er-Jahren befördert durch die direkte und indirekte Elektrifizierung stark. Strom deckt derzeit nur 18 % des Endenergieverbrauchs inklusive Bunkertreibstoffen und stofflicher Nutzung (AGEB, 2021). Sein Anteil steigt in den Zielszenarien, je nach technischem Fokus, bis 2045 auf 40-69 % an. Aufgrund der Trägheitsdynamiken - insbesondere beim Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung - entfaltet die Klimaschutzwirkung der direkten und indirekten Elektrifizierung der Endnutzungssektoren ihre Hauptwirkung ab den 2030er-Jahren, in denen die Nutzung von Strom und nicht-fossilen Brennstoffen stark ansteigt (Abbildung Z.8, Abbildung Z.10 und Abbildung Z.12). Die Potenziale für die direkte Elektrifizierung sind dabei hochgradig sektorspezifisch und bestimmen maßgeblich die Notwendigkeit des Einsatzes der nicht-fossilen Brennstoffe Wasserstoff, E-Fuels oder Bioenergie.

Aufgrund von Pfadabhängigkeiten müssen zahlreiche Investitionsentscheidun-

gen schon in den 2020er-Jahren mit dem Ziel der Klimaneutralität kompatibel sein. Infrastrukturen, der Gebäudebestand sowie Industrieanlagen zeichnen sich durch besonders lange Lebensdauern aus. Bereits bis 2030 haben E-Pkw im motorisierten Individualverkehr, Wärmepumpenheizsysteme bei der Gebäudewärme und elektrische Kessel bei der industriellen Dampferzeugung bei den Neuanschaffungen eine wichtige oder dominante Stellung

Die konkreten Ergebnisse zu den Transformationen der einzelnen Sektoren sind im Folgenden entlang der Kapitel des Szenarienreports zusammengefasst.

Z.5.1 Verkehr

Bis zum Jahr 2030 hat die direkte Elektrifizierung das größte THG-Emissionsminderungspotential im Verkehrssektor. Das gilt vor allem für Verkehrsträger und -segmente, die den größten Anteil an den direkten THG-Emissionen im Sektor haben, also für den Pkw- und teilweise den straßengebundenen Güterverkehr. Da für Pkw und teilweise auch für die Lkw schon jetzt kommerziell wettbewerbsfähige und technisch ausgereifte batterieelektrische Lösungen verfügbar sind, können durch die direkte Elektrifizierung kurzfristige Fortschritte bei der Dekarbonisierung erzielt werden (Abbildung Z.8).

Selbst mit einem massiven Anstieg des Anteils batterieelektrischer Fahrzeuge werden die Sektorziele aus dem KSG2021 bis zum Jahr 2030 nicht erreicht. Die kurzfristigen Minderungspotentiale durch eine reine Antriebswende sind begrenzt. Ein höherer Absatz batterieelektrischer Fahrzeuge wird gegenwärtig unter anderem durch fehlende öffentliche Ladeinfrastruktur limitiert. Zudem sind Bestandsfahrzeuge langlebig, was auch im Falle von hohen Absätzen von E-Pkw nur zu einer langsamen Änderung des Pkw-Gesamtbestandes führt (Abbildung Z.9). Die Szenarienanalysen zeigen, dass selbst bei einer deutlichen Kostendegression von batterieelektrischen Fahrzeugen, sehr schnellem Ladeinfrastrukturausbau und hohen CO₂-Preisen wie im Elektrifizierungsszenario kurzfristig zusätzliche Maßnahmen

erforderlich sein werden, um die Sektor-Ziele bis zum Jahr 2030 zu erreichen. In Frage kommen hierfür vor allem auch Maßnahmen zur Änderung des Mobilitätsverhaltens, wie der Wechsel auf andere Verkehrsträger.

Die indirekte Elektrifizierung (Nutzung der Energieträger Wasserstoff und E-Fuels) bildet bis zum Jahr 2045 in Teilbereichen des Güter-, Personenschienen- und Busverkehrs sowie für den Flugverkehr eine sinnvolle und für Verbrenner-Restbestände bei den Pkw eine notwendige Ergänzung zur direkten Elektrifizierung (Abbildung Z.9). Die Nutzung dieser Energieträger erfordert jedoch im Vergleich zur direkten Elektrifizierung einen erheblich größeren Einsatz an Energie, insbesondere von erneuerbarem Strom.

Z.5.2 Gebäudewärme

Die wichtigsten Säulen der Wärmewende zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestands sind ein konsequenter Energieträgerwechsel und eine Steigerung der Sanierungsrate und der Sanierungstiefe. Für den konsequenten Energieträgerwechsel sind der Umstieg auf Erneuerbare Energieträger in Gebäuden und bei der Fernwärmebereitstellung notwendig, unter anderem durch einen beschleunigten Austausch von Heizsystemen. Die Steigerung der Sanierungsrate- und der Sanierungstiefe ist unerlässlich, um die Endenergienachfrage zu reduzieren und häufig Voraussetzung für einen Einsatz klimaneutraler Heizsysteme wie elektrischer Wärmepumpen. Weiterhin wirkt auch eine effiziente Nutzung von Wohnraum unterstützend.

Die direkte Elektrifizierung spielt im Gebäudesektor in allen Zielszenarien eine entscheidende Rolle durch die Nutzung von Wärmepumpen oder Heizstäben in Gebäuden und für die Einspeisung in Wärmenetze. Die indirekte Elektrifizierung über Brennstoffzellen oder Wasserstoffkessel spielt dagegen im Gebäudesektor eine vergleichsweise kleine Rolle und ist abhängig vom Technologieszenario (Abbildung Z.10). Hauptgründe für die begrenzte Nutzung von wasserstoffbasierten Technologien sind

Abbildung Z.8: Zusammensetzung der Endenergienachfrage im Verkehrssektor des Leitmodells DEMO im Technologiemix-Szenario⁵

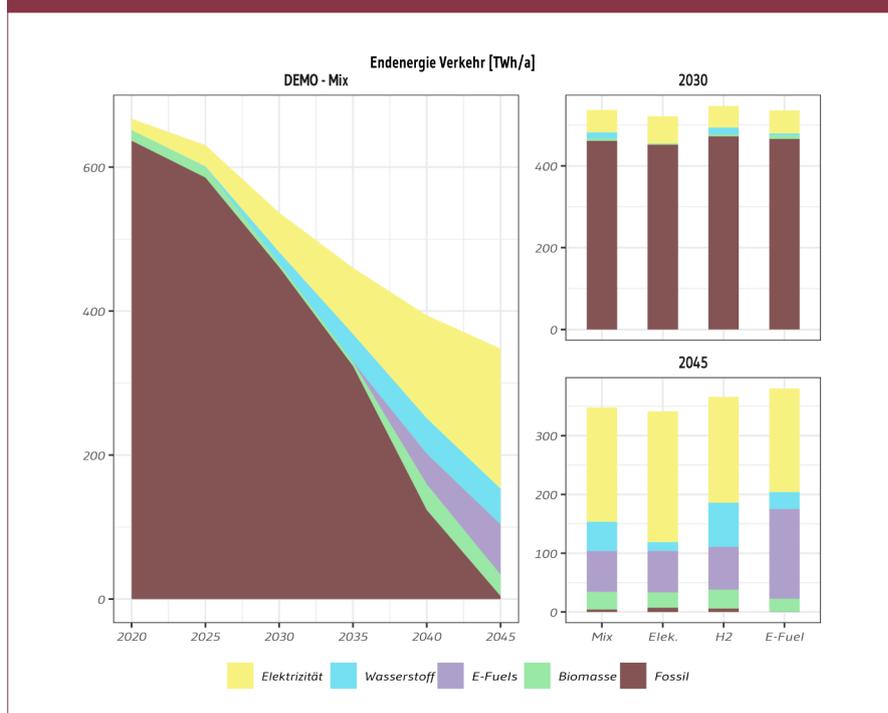
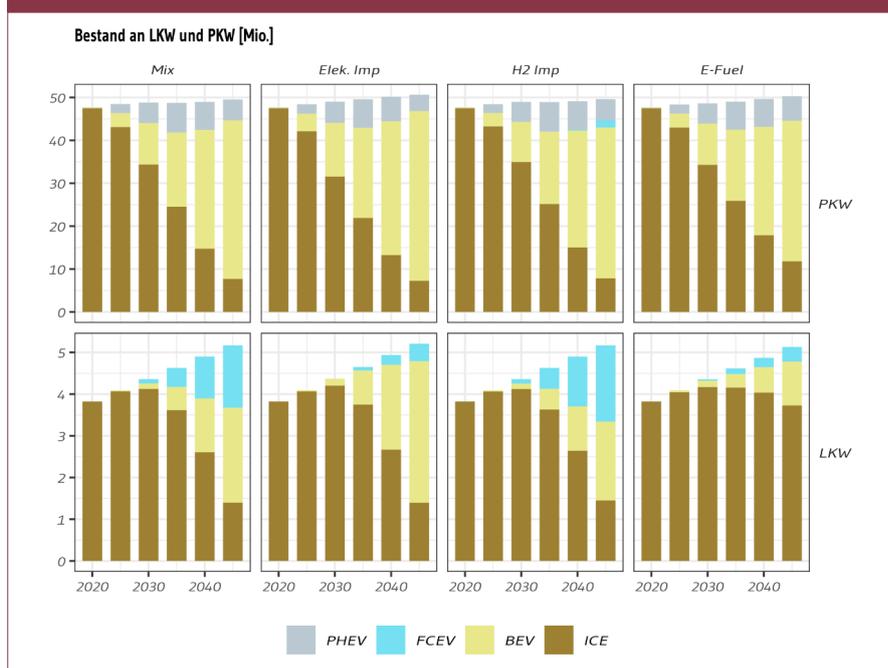


Abbildung Z.9: Zusammensetzung des Pkw- und Lkw-Bestands des Leitmodells VECTOR21 in ausgewählten Szenarien



Fahrzeugtypen: ICE - Verbrennungsmotor; BEV - batterieelektrisches Fahrzeug; FCEV - Wasserstoffbrennstoffzelle; PHEV - Plug-in Hybrid.

wettbewerbsfähigere Alternativen wie Wärmenetze und Wärmepumpen sowie die begrenzte Verfügbarkeit und hohe Kostenintensität von grünem Wasserstoff.

Um das Gebäude-Sektorziel für 2030 zu erreichen, sind laut Szenarienanalyse sehr ambitionierte Sanierungsraten

notwendig, die bis zum Jahr 2030 auf mindestens 1,5 - 2,0 % steigen. Die Sanierungstiefe der Gebäude entspricht in den Zielszenarien durchschnittlich über alle Gebäude nahezu dem KfW-55 Standard (Abbildung Z.11). Eine flächendeckende Nutzung des Passivhausstandards KfW-40 ist hingegen nicht Teil des kostenoptimalen Transformationspfades.

Abbildung Z.10: Zusammensetzung der Endenergienachfrage im Gebäudesektor des Leitmodells REMod im Technologiemix-Szenario

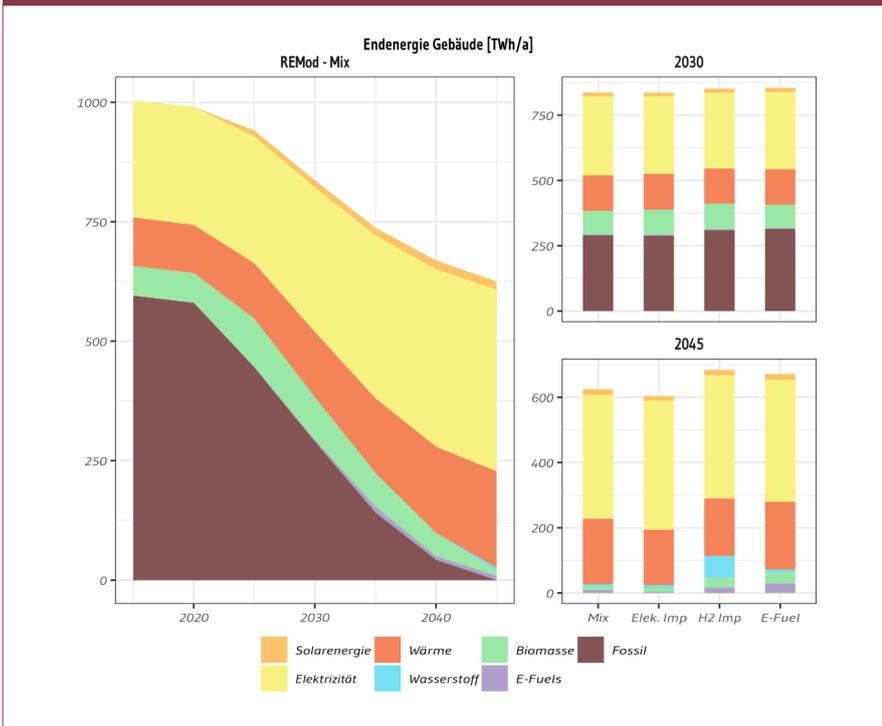
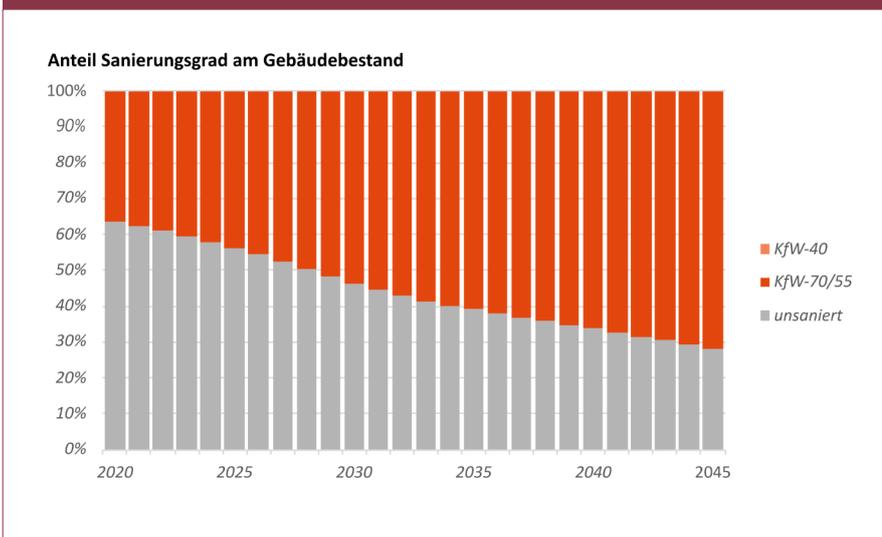


Abbildung Z.11: Sanierungsgrad des Gebäudebestands des Leitmodells REMod im Technologiemix-Szenario.



Sie könnte jedoch eine bedeutsamere Rolle spielen, wenn es beispielsweise Verzögerungen bei anderen vergleichbar günstigen Lösungen zur Dekarbonisierung gibt, wie dem Zubau Erneuerbarer Energien. Selbst bei einer Sanierungsrate von 2 % – einer Verdopplung gegenüber dem gegenwärtigen Niveau – verbleibt ein Viertel des Gebäudebestands im Jahr 2045 unsaniert. Ein maßgeblicher limitierender Faktor für die Umsetzungsgeschwindigkeit der Wärmewende sind die Kapazitäten des Baugewerbes.

2.5.3 Industrie

Die Transformation des Industriesektors muss neben technischen vor allem die Herausforderungen der Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit adressieren. Derzeit zeichnet sich der Industriesektor durch eine hohe Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, insbesondere für Hochtemperaturprozesse, technisch bedingte Abhängigkeiten von Energieträgern und Rohstoffen (etwa zur Stahlproduktion), prozessbedingte Emissionen aus chemischen Reaktionen im

Produktionsprozess (etwa Zement) und Energiebedarfen für die stoffliche Nutzung (insbesondere Chemie) aus. Für die Industrierende sind daher erhebliche Veränderungen in energieintensiven Produktionsverfahren nötig – bis hin zum vollständigen Ersatz etablierter Techniken. Darüber hinaus sind jedoch auch massive Anpassungen etablierter Preisstrukturen von Energieträgern sowie verstärkte Anstrengungen zur Steigerung von Energie und Materialeffizienz und Ausbau der Kreislaufwirtschaft notwendig.

Die Szenarien zeigen alternative Pfade zu einer nahezu CO₂-neutralen Industrieproduktion bis zum Jahr 2045, die übereinstimmend ambitionierte Veränderungen des gesamten industriellen Produktionssystems und eine tiefgreifende Transformation in vielen Branchen und Wertschöpfungsketten beinhalten (Abbildung Z.12). Die wichtigsten Vermeidungshebel sind die Energie- und Materialeffizienz beziehungsweise Kreislaufwirtschaft, der Prozesswechsel auf sekundäre Produktionsrouten und innovative CO₂-neutrale Verfahren sowie der damit verbundene, umfassende Einsatz von CO₂-neutralen Energieträgern (Abbildung Z.13). Trotz der massiven Prozess- und Produktionsveränderungen verbleiben in allen Szenarien prozessbedingte Restemissionen. Diese können durch den Einsatz von CO₂-Abscheidung und -Nutzung oder -Speicherung in der Klimawirkung weiter reduziert werden.

In allen Szenarien werden hohe Mengen an CO₂-neutralen Energieträgern eingesetzt. Die zwei wichtigsten Energieträger für die Industrie werden zukünftig Strom und Wasserstoff sein. 2045 werden zwischen 248 TWh (Wasserstoff-Szenario) und 413 TWh (Elektrifizierungs-Szenario) Strom direkt genutzt (2018: 223 TWh). Hinzu kommen – als indirekte Stromnutzung – zwischen 173 TWh (Elektrifizierungs-Szenario) und 342 TWh (Wasserstoff-Szenario) Wasserstoff (2018: 0 TWh)⁶. Im E-Fuels-Szenario wird nachfrageseitig wenig umgestellt – stattdessen Erdgas angebotsseitig durch synthetisches E-Methan ersetzt. Die Nutzung dieses Brennstoffs steigt so auf 347 TWh (Erdgasnutzung 2018: 245 TWh). In diesem Szenario bleibt die Stromnutzung

2045 auf dem Niveau von 2018 und es werden geringe Mengen Wasserstoff direkt verwendet (23 TWh).

Damit die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Industrieproduktion bis zum Jahr 2045 gelingen kann, ist der Zeithorizont bis 2030 entscheidend. Bis 2030 ist es essenziell, CO₂-neutrale Verfahren vom Pilot- und Demonstrations-Maßstab auf industrielles Niveau zu skalieren und ihren wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Hohe Investitionen in Neuanlagen sind nötig und Lösungen zur Bereitstellung von CO₂-neutralem Wasserstoff und

Strom – insbesondere die benötigte Infrastruktur – müssen umgesetzt werden. Ferner verlangt das Erreichen des 2030-Ziels des KSG2021 (KSG, 2021) für den Industriesektor bereits bis 2030 grundlegende Umstellungen: Ohne einen substantiellen Einsatz von neuen CO₂-armen oder CO₂-neutralen Produktionsverfahren, wie der Herstellung von Stahl über die Direktreduktion, ist das Sektorziel nicht zu erreichen.

Z.6 Umweltwirkungen der Energiewende

Große Herausforderungen zeigen sich beim durch die Energiewende induziertem Bedarf an kritischen Materialien.

Für die sechs Metalle Lithium, Nickel, Kobalt (vor allem Batteriefertigung), Dysprosium (Elektromotoren), Vanadium (stationäre Batterien) und Iridium (Elektrolyse) besteht dabei eine besonders hohe Knappheit gemessen an global verfügbaren Reserven und Ressourcen, die über den deutschen Anteil an der globalen Wirtschaftsleistung auf Deutschland heruntergerechnet wurden (Abbildung Z.14). Die Primärmaterialbedarfe hängen dabei sowohl von der Technologieausrichtung des Szenarios (zum Beispiel Elektrifizierungsgrad des Verkehrs) als auch von Entwicklungen innerhalb spezifischer Technologiecluster wie etwa Batterien oder PV-Module und der Recyclingquote ab. Um die Materialbedarfe der Energiewende zu decken, sind neben der Erschließung neuer Lagerstätten auch die Förderung der Kreislaufwirtschaft und die Erhöhung der Materialeffizienz wichtig. Außerdem kann die Reduktion der Nachfrage im Transportsektor, unter anderem durch die Reduzierung der durchschnittlichen Fahrzeug- und Batteriegröße, dabei helfen, knappe Materialien zu erhalten, die für die Energiewende von kritischer Bedeutung sind.

Die Energiewende hat eine deutliche Auswirkung auf die Flächennutzung in Deutschland. Der Anstieg des Bedarfs an einheimischem erneuerbarem Strom auf etwa 1000 TWh führt zu einem Anstieg des Flächenbedarfs durch Onshore Wind und Freiflächen-PV von heute 0,6 % auf 1,9-3,4 % der Landesfläche Deutschlands (Abbildung Z.15). Dieser Bedarf kann jedoch durch den in den Szenarien unterstellten Rückgang des Biomasseanbaus kompensiert werden, sodass der Gesamtflächenbedarf für die Erneuerbaren Energien sinkt. Bemerkenswert ist dabei, dass der spezifische Flächenbedarf pro Einheit erzeugter Energie (Strom und eventuell andere Energieträger) bei der Anbaubiomasse um den Faktor 16-20 höher ist als bei Freiflächen-PV, und etwa 15-18 höher als Onshore Windenergie. Zudem kann der größte Teil der von Windparks genutzten Fläche gleichzeitig land- oder forstwirtschaftlich ge-

Abbildung Z.12: Zusammensetzung der Endenergienachfrage im Industriesektor des Leitmodells FORECAST im Technologiemix-Szenario

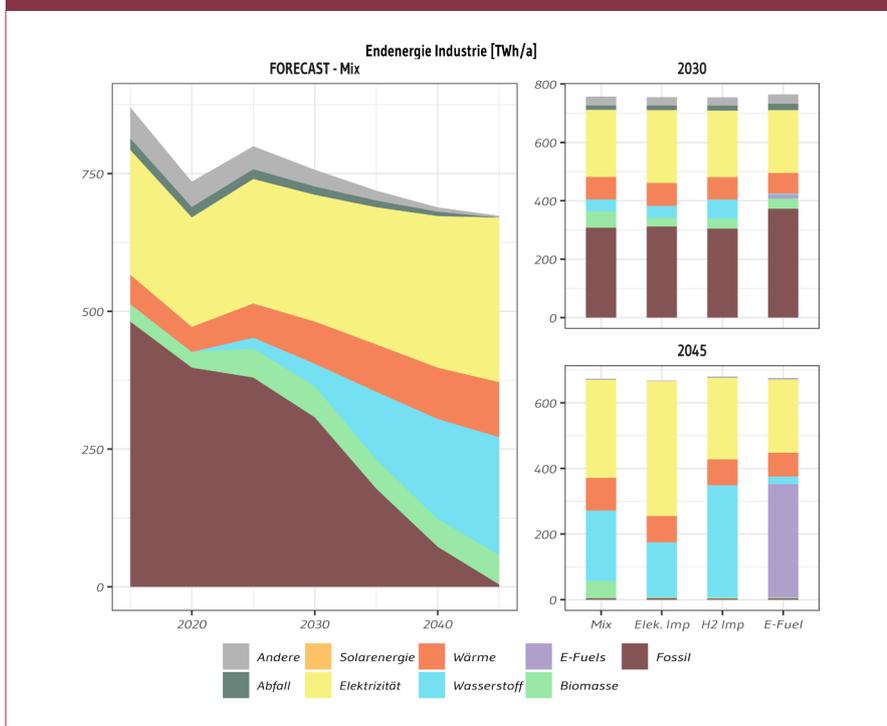


Abbildung Z.13: Beitrag einzelner Vermeidungsoptionen zur Emissionsminderung bis zum Jahr 2030 ggü. 2018 im Technologiemix-Szenario

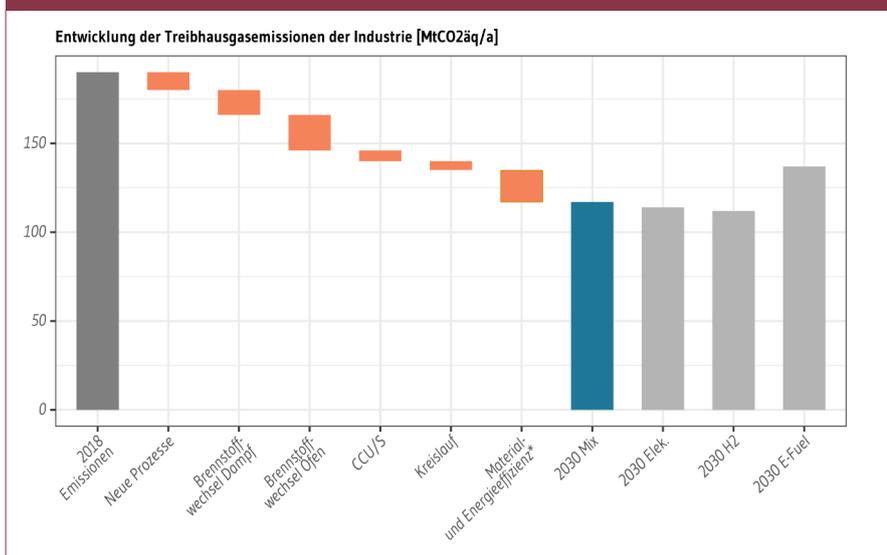
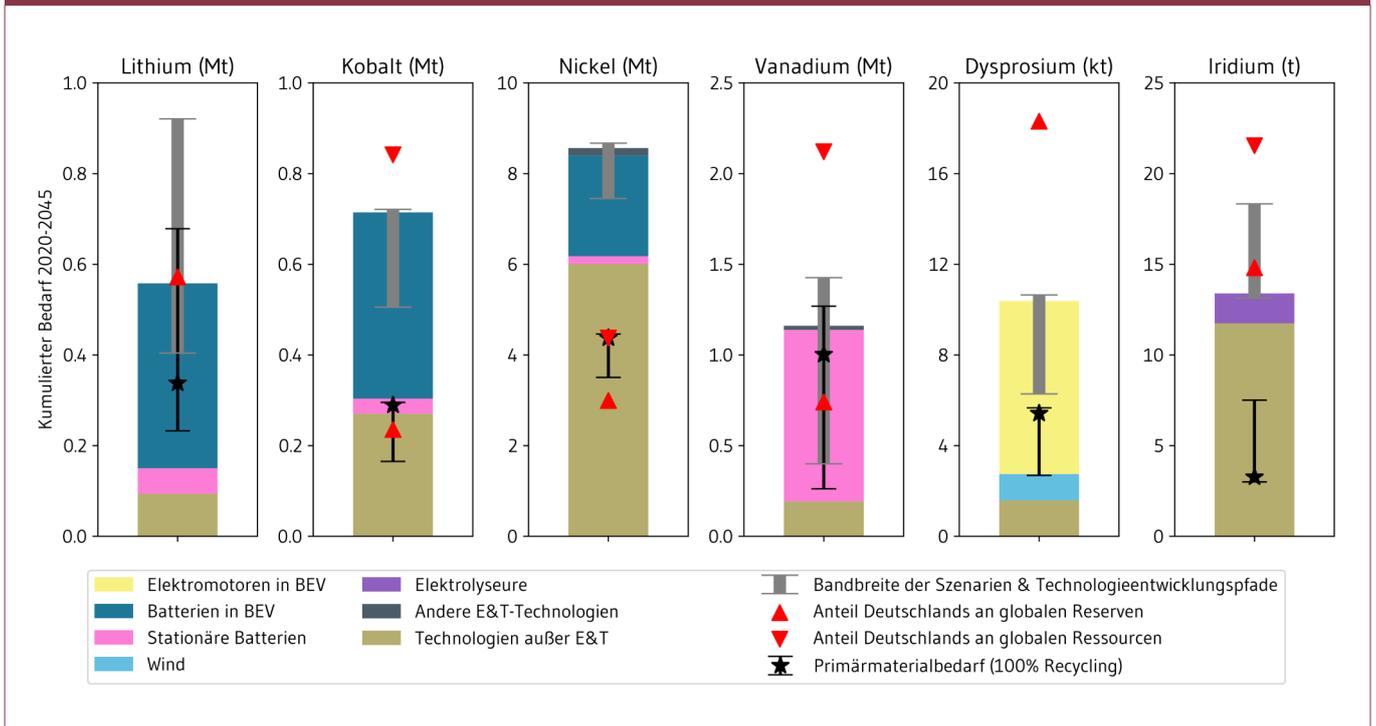


Abbildung Z.14: Der Beitrag von Energie- und Transporttechnologien (E&T) zum über den Zeithorizont 2020-45 kumulierten Materialbedarf der sechs kritischen Metalle Lithium, Kobalt, Nickel, Vanadium, Dysprosium und Iridium (Technologiemix-Szenario)



Graue Bandbreiten zeigen die Unsicherheit durch unterschiedliche Szenarien und Technologieentwicklungspfade. Rote Dreiecke markieren jene hypothetische Mengen, die auf Deutschland bei Verteilung der globalen Reserven und Ressourcen nach BIP entfallen würden. Selbst bei vollständigem Recycling könnte der Primärmaterialbedarf an Kobalt, Nickel, Vanadium und Lithium den deutschen Anteil der Reserven übersteigen.

nutzt werden. Auch für PV-Freiflächenanlagen besteht die Möglichkeit einer dualen Nutzung durch Agriphotovoltaik (Wirth, 2021). Weitere Optionen zur Begrenzung des Flächenverbrauchs für die Energiewende sind eine beschränkte Nutzung von Anbaubiomasse, die Nutzung von biologischen Reststoffen für die Energiegewinnung sowie der prioritäre Ausbau der Photovoltaik auf Dach- und Gebäudeflächen. In dem Maß, in dem erneuerbarer Strom, Wasserstoff und E-Fuels importiert werden, induziert die Energiewende zusätzlich zum inländischen Flächenbedarf weitere Flächenbedarfe im Ausland.

Die Energiewende bietet großen Zusatznutzen, besonders für die Gesundheit.

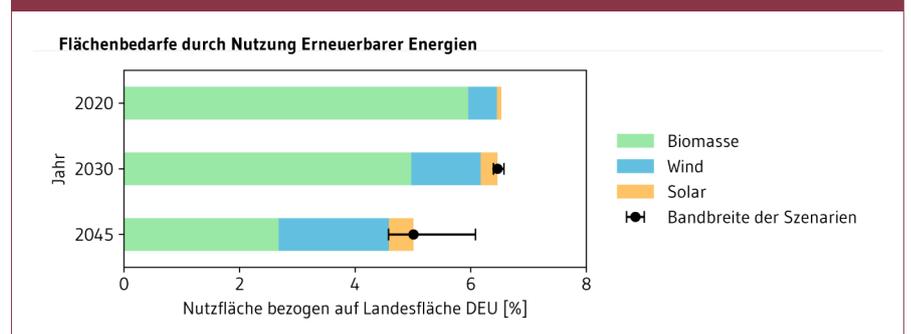
Alle Zielszenarien führen – eine weitere Umsetzung neuer Technologiestandards bei verbleibenden Verbrennungsprozessen vorausgesetzt – zu einer Verringerung der Luftverschmutzung und deren negativer Gesundheitswirkungen. Verglichen mit heute entspricht das einer Erhöhung der durchschnittlichen Lebenserwartung um etwa 0,4 Jahre. Dieser Effekt ist in Szenarien mit höherem Einsatz synthetischer E-Fuels geringer als in den

auf direkte Elektrifizierung oder Wasserstoffnutzung ausgerichteten Szenarien.

Die Gesundheitswirkungen des motorisierten Individualverkehrs verlagern sich von der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu den Produktionsprozessen. Diese indirekten Auswirkungen sinken im Gegensatz zu den direkten Auswirkungen nur um etwa 30 % bis 2045, falls die Produktionsprozesse und Rohstoffgewinnung nicht transformiert wer-

den. Eine ganzheitlich nachhaltige Verkehrswende erfordert daher die Regulierung der Lieferketten der Fahrzeuge, insbesondere im Bereich der E-Mobilität. Die substantiellen verbleibenden Umweltschäden im Szenario einer erfolgreichen Antriebswende unterstreichen den ökologischen Nutzen einer ganzheitlichen Mobilitätswende mit dem Ziel der Reduktion des Individualverkehrsaufkommens.

Abbildung Z.15: Gesamter Flächenbedarf von Biomasseanbau, Solar- und Onshore Windanlagen in Deutschland in Bezug auf die Landesfläche Deutschlands für die Jahre 2020, 2030 und 2045 und für das Technologiemix-Szenario



Die Unsicherheitspanne zeigt die Bandbreite der Zielszenarien. Die Nutzung der Flächen für Windparks schließt eine parallele land- oder forstwirtschaftlich Nutzung nicht aus. Auch für PV-Freiflächenanlagen ist die gleichzeitige landwirtschaftliche Nutzung möglich (Agriphotovoltaik).

Z.7 Systemforschung für die Energiewende: Weiterer Forschungsbedarf

Angesichts der zunehmenden Vielfalt von Klimaneutralitätsszenarien, wird ein strukturierter und systematischer Vergleich von Modellergebnissen und Annahmen zunehmend wichtiger. Die hier vorgelegten Analysen untersuchen erstmals auf Basis eines Ensembles von Energiesystem- und Sektormodellen Pfade zur Erreichung der Klimaneutralität Deutschlands 2045. Durch die Integration von Gesamtsystemmodellen mit Sektormodellen konnten einerseits relevante Wechselwirkungen zwischen den Sektoren berücksichtigt, andererseits Details der sektoralen Transformation ausbuchstabiert werden.

Der in dieser Studie vorgestellte Modellvergleich sollte in dieser Hinsicht als „proof-of-concept“ gesehen werden. Allerdings verbleiben eine Reihe von weiteren Forschungsbedarfen, die teilweise durch andere Ariadne-Forschungsaktivitäten abgedeckt sind, teils in Folgestudien angegangen werden müssen:

- ▶ **Erweiterung des Lösungsraums:** Die hier vorgestellten Szenarien zeigen eine plausible Bandbreite künftiger Entwicklungen bezüglich direkter und indirekter Elektrifizierung. Gleichzeitig können sie nicht den Anspruch auf eine vollständige Abdeckung des Lösungsraums erheben. Weitere Szenarien sollten beispielsweise die Möglichkeiten und Grenzen einer stärker auf Energieeffizienz und Lebensstiländerungen ausgerichteten Klimaschutzstrategie beleuchten, oder das Potenzial einer weitergehenden Nutzung von technischen CO₂-Senken, insbesondere CCS, untersuchen.
- ▶ **Granularität der Systemtransformation:** Spezifische Aspekte der Energiewende müssen im Szenarienkontext konkreter ausbuchstabiert werden, um den damit einhergehenden Herausforderungen begegnen zu können. Prominent zu nennen wäre hierbei der Infrastrukturausbau für Stromübertragungs- und Verteilnetze, Wasserstoffnetze,

Wärmenetze und CO₂-Transport. Des Weiteren kann durch eine tiefere Integration zwischen Sektormodellen und Gesamtsystemmodellen eine insgesamt realistischere Abbildung der Systemdynamik erreicht werden.

- ▶ **Vertiefende Modellvergleiche:** Durch eine noch breitere Abdeckung kann ein strukturierter Vergleich nicht nur unter den Ariadne-Modellen, sondern auch anderer in prominenten Szenarienstudien genutzten Modellsysteme erreicht werden. Dadurch werden Unterschiede in Annahmen und Implikationen verschiedener Klimaschutzpfade deutlich (ESYS et al., 2019; Wietschel et al., 2021).
- ▶ **Wirkungsanalyse und gesellschaftliche Trägerschaft:** Ebenfalls besteht die Notwendigkeit, die Szenarien durch detaillierte Analysen der Kosten und makro-ökonomischen Wirkungen der Energiewende zu ergänzen. Erste Ergebnisse zeigen beispielsweise, dass die Auswirkungen der CO₂-Bepreisung über Einkommensgruppen hinweg stark variieren können, und dass die Verteilungswirkungen wiederum stark von der Ausgestaltung der Politiken abhängen. Künftige Analysen werden über den CO₂-Preis hinaus die Verteilungswirkungen weiterer Politikinstrumente untersuchen. Verteilungsgerechtigkeit und ökologische Nachhaltigkeit sind auch wichtige Faktoren für gesellschaftlichen Akzeptanz und Trägerschaft (Blum, M. et al., 2021).
- ▶ **Politiken und Maßnahmen:** Angesichts der durch die Szenarien aufgezeigten enormen Herausforderungen bezüglich der systemischen Transformation stellt sich nun in verschärftem Maße die Frage nach geeigneten Politiken und Maßnahmen, um den Weg zur Klimaneutralität zu ebnen. Die Untersuchung von geeigneten Politikinstrumenten ist bereits Gegenstand der Forschung in Ariadne und anderen Projekten (Berneiser et al., 2021; Edenhofer et al., 2019; Fahl et al., 2021; Perino et

al., 2021; Richstein and Neuhoff, 2019). Die weitere Integration dieses Forschungsstrangs mit der Szenarienanalyse zur Klimaneutralität ist ein wichtiger Schwerpunkt künftiger Forschung.

Z.8 Politischer Handlungsbedarf für die Klimaneutralität 2045

Die vorliegenden Analysen verdeutlichen die Dringlichkeit des politischen Handlungsbedarfs, um Klimaschutzziele zu erreichen und den Kurs auf Klimaneutralität 2045 anzupassen. Der Vergleich der sektorspezifischen Transformationswegen mit den gegenwärtigen Politikzielen weist auf erhebliche Diskrepanzen hin. Ohne zusätzliche Maßnahmen in allen Sektoren werden die Klimaschutzziele für 2030 und 2045 aller Voraussicht nach verfehlt. Obwohl Politiken und Maßnahmen nicht explizit in den Szenarien abgebildet sind, lassen sich aus den Szenarienanalysen bereits folgende Erkenntnisse im Hinblick auf politische Handlungsbedarfe ziehen:

- ▶ **Sektorübergreifende CO₂-Bepreisung stärken:** Die Lenkungswirkung eines deutlichen CO₂-Preissignals ist entscheidend, um effiziente Emissionsminderungspotenziale zu nutzen und Anreize für klimaneutrale Investitionen zu schaffen. Ein zunehmend über die Sektoren hinweg harmonisierter CO₂-Preis kann zudem eine Flexibilisierung der Sektorziele ermöglichen, die angesichts der Diskrepanz zwischen den sektoralen Minderungszielen des KSG2021 für 2030 und der sektoralen Lastenteilung in den kostenoptimalen Szenarien geboten scheint.
- ▶ **Erneuerbare Energien massiv ausbauen:** Die hohe zukünftige Stromnachfrage erfordert einen enormen Ausbau von Windkraft und Photovoltaik. Bis 2030 ist voraussichtlich ein Zubau nötig, der etwa einer Verdreifachung der Ausbaugeschwindigkeit der vergangenen Dekade entspricht und somit über dem Ausbaupfad des EEG liegt. Daher ist eine Überarbeitung des EEG sowie die Neuord-

nung und Beschleunigung von Genehmigungsverfahren nötig. Zusätzlich müssen weitere Gesetze wie beispielsweise das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG2021) mit den Anforderungen einer auf Erneuerbaren Energien basierenden Versorgung in Einklang gebracht werden.

- ▶ **Kohleausstieg gestalten:** Der zur Erreichung der Klimaziele notwendige CO₂-Preis macht die weitere Kohleverstromung zunehmend unwirtschaftlich. Es scheint daher hochgradig unplausibel, dass bei gleichzeitiger Einhaltung der Klimaziele Kohlekraftwerke gemäß Kohleausstiegsgesetz noch über 2030 hinaus substantiell zur Stromversorgung beitragen. Der Strukturwandel in den betroffenen Regionen wird sich entsprechend beschleunigen und muss aktiv gestaltet werden. Zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit werden zusätzliche gas- oder wasserstoffbefeuerte Spitzenlastkraftwerke benötigt.
- ▶ **Infrastruktur zügig ausbauen:** Die modellierten Mengen an Strom, Fernwärme und Wasserstoff, sowie relevanter Kenngrößen für die Sektorkopplung und Dekarbonisierung anderer Sektoren wie E-Pkw und Wärmepumpen liegen über den Mengen, die in der aktuellen Infrastrukturplanung vorgesehen sind. Die Infrastruktur droht damit zum Engpass in allen Sektoren zu werden. Eine rasche Anpassung der Infrastrukturplanung und ihrer beschleunigten Umsetzung ist daher notwendig.
- ▶ **Engpässe bei der Ladeinfrastruktur für die Verkehrswende beseitigen:** Die direkte Elektrifizierung ist der größte Dekarbonisierungshebel des Verkehrssektors. Um den notwendigen Mindest-Hochlauf an batterieelektrischen Fahrzeugen zu erreichen, ist ein zügiger und starker Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur notwendig, da diese zurzeit ein Hindernis in der Verkehrswende darstellt. Die Spanne des Gesamtbedarfs an öffentlich zugänglichen Ladepunkten hängt stark vom Lade-

konzept ab, welches zügig ausbuchstabiert werden muss.

- ▶ **Wärmewende sozialverträglich gestalten:** Aufgrund der bestehenden Eigentums- und Mietlandschaft des Gebäudesektors bedarf es eines stringenten informatorischen, ordnungspolitischen und förderpolitischen Instrumentenmix zur Realisierung der Dekarbonisierung. Eine besondere Herausforderung ist die Sozialverträglichkeit der Wärmewende, die zusätzliche Instrumente erfordert.
- ▶ **Engpässe im Baugewerbe angehen:** Insbesondere die Wärmewende, aber auch die Transformation der Industrieanlagen und der Infrastrukturaufbau benötigen hochqualifizierte Handwerkerinnen und Handwerker sowie deutlich höhere Kapazitäten im Baugewerbe als aktuell vorhanden. Ohne sofortige massive Unterstützung von Weiterbildungs- und Umschulungsangeboten können diese Knappheiten die Transformation und somit die Erreichung der Klimaziele ausbremsen.
- ▶ **Preissignale für die Industriewende setzen:** Für die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Industrieproduktion ist die Wirtschaftlichkeit CO₂-neutraler Verfahren essenziell. Wichtig sind daher klare Preissignale, sodass Strom gegenüber Erdgas der attraktivere Energieträger wird. Dies kann - abhängig von der sonstigen Ausgestaltung des Strompreises – ab 100 bis 150 Euro/tCO₂ gelingen. Allerdings sind gleichzeitig geeignete Maßnahmen zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Industrie – nicht nur der energieintensiven – notwendig.
- ▶ **Erneuerbaren Wasserstoff und E-Fuels in ihrer Anwendung priorisieren:** Ihre Verfügbarkeit wird zumindest mittelfristig bis in die 2030er-Jahre beschränkt bleiben. Entsprechend sollte ihr Einsatz für no-regret Anwendungen, wie Wasserstoff für Stahl- und Ammoniakproduktion sowie E-Fuels für Flug- und Schiffsver-

kehr und die Grundstoffchemie, priorisiert werden.

- ▶ **Ganzheitliche Strategie für CO₂-Entnahmen erarbeiten:** Das Ziel der deutschen Klimaneutralität ist ohne CO₂-Entnahmen nicht erreichbar. Daher sollte eine nationale CO₂-Entnahme-Strategie einschließlich CCS erarbeitet werden, um Technologiehochlauf, Infrastrukturaufbau und Speicherung in die Mitte der gesellschaftlichen Debatte zu rücken.
- ▶ **Rohstoffbedarf nicht-energetischer Rohstoffe untersuchen:** Praktisch alle für die Transformation zur Verfügung stehenden Maßnahmen erfordern einen erhöhten Einsatz an Technologie und Material. Aus diesem Grund ist dieser Bedarf an nicht-energetischen Rohstoffen vertieft zu untersuchen und die Möglichkeiten und Wirkungen von Kreislaufwirtschaft zu integrieren.
- ▶ **Umweltwirkungen entlang der Wertschöpfungskette beachten:** Während die Energiewende in vielen Bereichen einen deutlichen ökologischen Nutzen entfaltet, führt der Übergang zu einem erneuerbaren Energiesystem auch zu einer Verlagerung der Umweltwirkungen von Energietechnologien von der Nutzungsphase zur Produktionsphase. Dies ist vor allem für Batterietechnologien für die E-Mobilität, aber auch die erneuerbare Stromerzeugung relevant. Entsprechend kann eine wirklich nachhaltige Energiewende nur dann gelingen, wenn (a) Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft auch bei Klimaschutztechnologien gestärkt werden, und (b) in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern die globalen Wertschöpfungsketten strengen Umweltstandards unterworfen werden.
- ▶ **Innovationen für die Klimaneutralität fördern:** Das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 wird ohne weitere Innovationen nicht erreichbar sein, die gezielte Förderung brauchen. Wichtig sind auch in Zukunft technische Innovationen für Erneuerbare Energieträger, Energiespeicher und

Wasserstofftechnologien, die zu Kostendegression und verbesserter Energie- und Materialeffizienz führen. Auch die Umstellung von Industrieprozessen auf Elektrizität und Wasserstoff erfordert weitere Forschung und Entwicklung. Neben dieser technischen Dimension besteht in Zukunft verstärkter systemischer Forschungsbedarf, da Klimaneutralität ein hohes Maß an Vernetzung zwischen den Sektoren und beteiligten Akteuren verlangt. Der dezentralen und flexiblen Steuerung von Energieangebot und -nachfrage kommt eine Schlüsselrolle für die Integration variabler erneuerbarer Stromerzeugung zu, was technische, digitale und sozioökonomische Innovationen erfordert.

Literaturangaben

- AGEB, 2020a. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2018 und 2019 sowie zusammenfassende Zeitreihen zum Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken für Jahre von 2009 bis 2019. AGEB [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_19_v3.pdf.
- AGEB, 2021. Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019. Datenstand: 25. Februar 2021. AGEB [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=bilanz19d.xlsx.
- AGEB, 2020b. Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019. Stand: März 2020. AGEB [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2019_20200325_dt.pdf.
- Berneiser J, Burkhardt A, Henger R, Köhler B, Meyer R, Sommer S, Yilmaz Y, Kost C, Herkel S, 2021. Hintergrund: Analyse der Herausforderungen und Instrumente für eine Wärmewende im Gebäudesektor. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/erausforderungen-und-instrumente-im-gebauedesektor/>.
- Blum, M., Colell, A., Hoffmann, J., Karohs, K., Kowarsch, M., Krude, M., Saur, M., Thiel, H., 2021. Ariadne-Report zur Werten und Zielen für Strom- und Verkehrswende. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/ariadne-report-fokusgruppen-verkehrswende-stromwende/>.
- BNetzA, 2019. Bedarfsermittlung 2019-2030. Bestätigung Netzentwicklungsplan Strom. BNetzA [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP2019-2030_Bestaetigung.pdf.
- Edenhofer O, Flachsland C, Kalkuhl M, Knopf B, Pahle M, 2019. Optionen für eine CO2-Preisreform. MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Working%20Paper/2019_MCC_Optionen_f%C3%BCr_eine_CO2-Preisreform_final.pdf.
- EEG, 2021. EEG 2021 - Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. [Aufruf am: 05.09.2021] URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html.
- ESYS, BDI, dena, 2019. Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt! Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050 in Deutschland. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/impulspapier-studienvergleich>.
- Fahl U, Hufendiek K, Kittel L, et al., 2021. Kurzdossier: Industrierende - Wettbewerbseffekte und Carbon Leakage. Neue Politikmaßnahmen im Zuge des Europäischen Green Deal. | Ariadne. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/kurzdossier-carbonleakage/>.
- Gierkink M, Lencz D, Arnold F, 2019. Auswirkungen einer Beendigung der Kohleverstromung bis 2038 auf den Strommarkt, CO2-Emissionen und ausgewählte Industrien. Eine Analyse des Abschlussberichts der WSB-Kommission. Im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2019/08/EWI-Studie_Auswirkungen-Kohleausstieg-bis-2038_20200515.pdf.
- Graichen P, Litz P, Peter F, 2019. Die Kohlekommission. Ihre Empfehlungen und deren Auswirkungen auf den deutschen Stromsektor bis 2030. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Kohlekommission_Ergebnisse/167_Kohlekommission_DE.pdf.
- KohleAusG, 2020. Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze. [Aufruf am: 05.09.2021] URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/kohleausg/BJNR181800020.html>.
- KSG, 2021. Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl121s3905.pdf.
- KSG, 2019. Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>.
- KSPr, 2019. Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>.
- Matthes F, Hermann H, Loreck C, Mendelevitch R, Cook V, 2019. Die deutsche Kohle-Verstromung bis 2030. Eine modellgestützte Analyse der Empfehlungen der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Deutsche-Kohleverstromung-bis-2030.pdf>.
- Perino G, Willner M, Pahle M, 2021. Analyse: Den EU-Emissionshandel zukunftsfähig gestalten. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-emissionshandel-zukunftsfahig-gestalten/>.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021. Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KN-DE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf.
- Richstein JC, Neuhoﬀ K, 2019. CO2-Differenzverträge für innovative Klimalösungen in der Industrie. DIW Berlin [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.679524.de/diw_aktuell_23.pdf.
- Wietschel M, Zheng, L., Arens, M., Hebling, C., Ranzmeyer, O., Schaadt, A., Hank, C., Sternberg, A., Herkel, S., Kost, C., et al., 2021. Meta-studie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/Metastudie_Wasserstoff_Abschlussbericht.pdf.
- Wirth H, 2021. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Fraunhofer ISE [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>.



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:

 @AriadneProjekt

 ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? Durch den Faden der Ariadne gelang Theseus in der griechischen Mythologie die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne. Im Konsortium von mehr als 25 Forschungseinrichtungen führt Ariadne durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, erforscht Optionen zur Gestaltung der Energiewende und erarbeitet wichtiges Orientierungswissen für politische Entscheider. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung